



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 199 55 759 A 1**

⑤1 Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**G 01 J 3/12**  
G 01 J 3/18  
G 02 B 26/08

②1 Aktenzeichen: 199 55 759.4  
②2 Anmeldetag: 20. 11. 1999  
④3 Offenlegungstag: 23. 5. 2001

DE 199 55 759 A 1

⑦1 Anmelder:  
Colour Control Farbmeßtechnik GmbH, 09114  
Chemnitz, DE

⑦2 Erfinder:  
Stock, Volker, 09113 Chemnitz, DE; Otto, Thomas,  
09249 Taura, DE; Frizsch, Uwe, 09238 Auerswalde,  
DE

⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:

DE-PS	9 39 232
DE-AS	12 14 019
DE	198 60 021 A1
DE	196 11 218 A1
DE	37 34 588 A1
DE-OS	22 25 870
US	48 67 532
EP	06 71 615 A2
EP	05 40 966 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

- ⑤4 Spektrometer mit mikromechanischem Spiegel
- ⑤7 Die Erfindung betrifft Anordnungen zur optischen Spektroskopie einer Strahlung vermöge eines Monochromators mit Einzelsensoren, wobei zur sequentiellen Selektion der zu analysierenden Wellenlängen ein mikromechanischer Spiegel benutzt wird. Diese Anordnung gestattet mit besonders einfachen Mitteln ein schnelles Scannen des gewünschten Wellenlängenbereichs. In weiteren Anordnungen wird die gemeinsame Nutzung dieses Spiegels in Doppelmonochromatoren vorgeschlagen.
- Ferner wird in einer zusätzlichen Anordnung die Integration des Beugungsgitters direkt auf die Oberfläche des mikromechanischen Spiegels angegeben. Eine vorteilhafte Ausführung besteht dabei in einer hologrammförmigen Ausprägung dieses ebenen Gitters, welche zusätzliche abbildende Elemente erübrigt.
- In einem besonderen Verfahren zum Betrieb dieser Anordnung wird eine hohe spektrale Auflösung erreicht, indem der mikromechanische Spiegel bei seiner mechanischen Resonanzfrequenz betrieben wird und somit ein extrem stabiler Bewegungsablauf eine genaue Wellenlängenreproduzierbarkeit gestattet.

DE 199 55 759 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der optischen Spektroskopie und betrifft eine Anordnung zur Vereinfachung des Aufbaus von mechanisch parametrisierbaren Gittermonochromatoren.

Gegenstand der Erfindung sind speziell Monochromatoren, die aus mindestens einem feststehenden Raumfilter zur Begrenzung des Raumwinkelbereichs der einfallenden polychromatischen Strahlung, einem dispersiven Element zur spektral abhängigen Raumwinkeländerung dieser Strahlung sowie mindestens einem weiteren feststehenden Raumfilter zur Entnahme der in den betreffenden Raumwinkelbereich geleiteten monochromatischen Strahlungsanteile bestehen, wobei zusätzliche Mittel zur steuerbaren strahlengeometrischen Raumwinkeländerung der Strahlung vorhanden sind.

Üblicherweise bestehen die dispersiven Elemente aus Prismen oder Beugungsgittern. Der eingangssseitige Raumfilter wird meist durch eine Spaltblende in Verbindung mit abbildenden Elementen (z. B. Linsensysteme und/oder Hohlspiegel) realisiert und dient i. allg. zur Parallelisierung der einfallenden polychromatischen Strahlung innerhalb eines engen Winkelbereichs. Oft wirkt das dispersive Element selbst strahlenoptisch abbildend (z. B. Konkavgitter).

Analog besteht der ausgangssseitige Raumfilter aus abbildender Optik in Verbindung mit einer Ausgangsspaltblende und begrenzt den Raumwinkelbereich, aus welchem die Strahlungsanteile mit der entsprechenden richtungspezifischen Wellenlänge dem Monochromator entnommen werden können.

Spektrometeranordnungen auf Grundlage dieser Art von Monochromatoren sind hinlänglich bekannt; ein einfaches Beispiel ist in DE 198 60 021 ersichtlich.

Die steuerbare Raumwinkeländerung der Strahlung wird erreicht durch mechanische Drehbewegungen des Beugungsgitters bzw. Dispersionsprismas und/oder durch Drehung zusätzlich im Strahlengang angeordneter Spiegel. Nach dem Stand der Technik erfolgt der Antrieb derselben durch Schrittmotoren. Die Winkelauflösung korreliert dabei mit der geeignet unterteilten Schritteinteilung des Motors. Weitergehende Feinunterteilungen bzw. -korrekturen werden mittels zusätzlicher Piezoaktuatoren erreicht.

Lange Scanzeiten bzw. lange Ansprechzeiten sowie großvolumige, mechanisch aufwendige und stör anfällige Aufbauten sind die Folge.

Einige dieser Nachteile wurden teilweise umgangen mit schweren ballistischen Aufbauten, bei denen für jeden Sensorwert die tatsächliche mechanische Winkelposition bestimmt und darüber den Meßwerten die jeweilige Wellenlänge zugeordnet wird. So ist in DE 43 17 948 ein gefedert gelagerter Schwingspiegel als besonderes Merkmal aufgeführt, dessen spezieller Nachteil der erhebliche Aufwand zur Winkelsteuerung bzw. -messung ist.

Allgemein haben die mechanisch bewegten Bauteile genannter Monochromatoren den Nachteil, daß deren Lebensdauer bei geforderter Präzision begrenzt ist und/oder die Lagerung dieser Teile einen hohen Fertigungs- und Justageaufwand bedingt.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine einfache Anordnung für nach dem mechanischen Selektionsprinzip arbeitende Monochromatoren anzugeben, die oben aufgeführte Nachteile umgeht. Gelöst wird diese Aufgabe durch die in den Ansprüchen angegebenen Anordnungen mit den erfindungsgemäßen Merkmalen. Weitere vorteilhafte Varianten der erfindungsgemäßen Anordnung sowie bevorzugte Verfahren zum Betrieb derselben sind in den Unteransprüchen angegeben.

Erfindungsgemäß ist im Strahlengang des Monochroma-

tors nach dem Oberbegriff des ersten Anspruchs ein monolithischer mikromechanischer Drehspiegel angeordnet, mit dessen Hilfe in Abhängigkeit von seiner Winkelposition die Strahlung der jeweiligen Wellenlänge selektiert werden kann.

Die Verwendung derartiger monolithischer mikromechanischer Spiegel ist bislang nur im Zusammenhang mit dem Laserfernsehen bekannt; die Herstellung und der Betrieb desselben ist in den Anmeldungen DE 41 00 358 und DE 42 24 599 hinreichend beschrieben. Der Antrieb dieser Spiegel erfolgt galvanisch oder vorzugsweise elektrostatisch; die tatsächliche Winkelposition wird bevorzugt kapazitiv gemessen.

Der Vorteil dieser Anordnung ist ein besonders einfacher, preiswerter, kompakter und robuster Aufbau des Monochromators bei gleichzeitiger kurzer Ansprechzeit. Ferner ist eine stufenlose Winkeleinstellung erreichbar. Der monolithische einkristalline Aufbau des Kippspiegels bewirkt zudem eine theoretisch unbegrenzte Lebensdauer bei beliebig wiederholten Bewegungsabläufen.

Eine Kombination mehrerer Monochromatoren unter Verwendung eines einzigen mikromechanischen Spiegels bietet neben einem konstruktiv einfachen Aufbau insbesondere den Vorteil des exakten Wellenlängen-Gleichlaufs der eigenständigen Kanäle, was z. B. für Referenzmessungen einer Strahlungsquelle oder für Monochromatorreihenschaltungen von Bedeutung ist.

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, das Beugungsgitter direkt auf der Oberfläche des mikromechanischen Spiegels anzuordnen. Neben der baulichen Vereinfachung der Monochromatoranordnung liegt der besondere Vorteil in der technologisch durchgängigen Herstellbarkeit der Spiegel-Gitter-Kombination.

Eine vorteilhafte Variante der Erfindung beinhaltet die geeignete Gestaltung dieses integrierten Beugungsgitters in der Weise, daß durch eine hologrammartig gestaltete ortsabhängige Orientierung der Gitterlinien zusätzlich abbildende Eigenschaften des ansonsten ebenen Gitters erzielt werden. Gegebenenfalls können hierdurch Linsen bzw. Konkavspiegel zur Strahlformung ersetzt werden.

Die erfindungsgemäße Monochromatoranordnung läßt sich insbesondere für Spektrometeranwendungen verwenden, bei denen entsprechende Strahlungsdetektoren dem Austrittsspalt direkt oder hinter zusätzlichen Probenanordnungen indirekt nachgeschaltet sind oder diesen gar ersetzen.

Bei einem Verfahren zum Betrieb des erfindungsgemäßen Monochromators wird die Tatsache ausgenutzt, daß der monolithische mikromechanische Spiegel aufgrund seiner hysterese-freien Torsionsbänder in Verbindung mit seinem Trägheitsmoment eine Resonanzfrequenz mit besonders hoher Resonanzgüte aufweist, und folglich eine Schwingungsanregung bei dieser Frequenz eine extrem hohe Stabilität und Vorhersagbarkeit des Bewegungsablaufs bewirkt. Der Vorteil ist eine hohe Genauigkeit der zeitlichen Wellenlängenauflösung trotz diskreter und/oder ungenauer Spiegelwinkelmessungen. Zusätzlich steht durch die Resonanzüberhöhung ein größerer Auslenkbereich und damit ein größerer nutzbarer Wellenlängenbereich zur Verfügung.

Die Erfindung soll in einem Ausführungsbeispiel anhand von Zeichnungen näher erläutert werden. Es zeigen:

Fig. 1 den prinzipiellen Aufbau der erfindungsgemäßen Monochromatoranordnung,

Fig. 2 eine Variante dieses Monochromators auf Basis eines Beugungsgitters,

Fig. 3 eine Monochromatoranordnung mit einem auf dem Kippspiegel integrierten Beugungsgitter,

Fig. 4 einen Doppelmonochromator mit einem gemeinsa-

men Beugungsgitter auf dem Kippspiegel,

Fig. 5 einen Monochromator mit abbildendem Beugungsgitter auf dem Kippspiegel.

Zur Formung des Strahlenganges in einem beispielhaften Monochromator gemäß Fig. 1 und 2 sind angeordnet:

- ein eingangsseitiger Raumfilter, bestehend aus einer spaltförmigen Strahlungseinkopplung vermöge einer Blende (1) oder einer Fasereinkopplung (10), sowie aus optisch abbildenden Elementen wie beispielsweise einem Kollimatorspiegel (3) oder einem Linsensystem (7),
- ein dispersives Element aus Prisma (4) oder Beugungsgitter (8),
- ein mikromechanischer Kippspiegel (5) inklusive Spiegelantrieb (6) für die räumlich sequentielle Wellenlängenselektion mit typischen lateralen Abmaßen von  $5\text{ mm} \cdot 5\text{ mm}$ ,
- ein ausgangsseitiger Raumfilter aus Abbildungsoptik (3; 7) mit einer spaltförmigen Blende (2) oder einem genügend schmal dimensionierten Sensor (11) in deren Brennebene.

Die in den Monochromator der Fig. 1 eingekoppelte polychromatische Strahlung wird mit Hilfe des Raumfilters (1, 3) parallelisiert. Die nun gerichtete Strahlung durchläuft das Dispersionsprisma (4) und erfährt eine erste wellenlängenabhängige Richtungsänderung. Die Strahlrichtung einer jeden Wellenlängenkomponeute der polychromatischen Strahlung wird durch den mikromechanischen Spiegel (5) derart abgelenkt, daß die so umgelenkte Strahlung wiederholt das Prisma (4) passiert und einer erneuten wellenlängenabhängigen Richtungsänderung unterworfen wird. Mit Hilfe des ausgangsseitigen Raumfilters (3, 2) werden die parallelen Teilstrahlungen fokussiert und je nach Winkelstellung des Spiegels (5) wellenlängenselektiv ausgekoppelt.

Die räumliche Anordnung dieser optischen Elemente kann geeignet wahlfrei variiert werden, beispielsweise als Autokollimationsspektrograph gemäß Fig. 1 bis 5. Die Aufstellung nach Fig. 1 und 2 nutzt zudem den bekannten Vorteil der optischen Winkelverdopplung des mechanischen Spiegelausschlags aus.

Die Fig. 3 zeigt eine Monochromatoranordnung mit einem eingangs- und ausgangsseitigem Raumfilter (1, 7; 7, 2) sowie einem Kippspiegel (5) und einem Beugungsgitter (9), wobei dieses Beugungsgitter gemäß den Methoden der Mikrostrukturierung erfindungsgemäß direkt auf der Oberfläche des mikromechanischen Kippspiegels angeordnet ist, und zwar mit Parallelität zwischen Gitterlinien und Spiegeldrehachse. Im Ausführungsbeispiel ist das Beugungsgitter beispielhaft als Phasengitter ausgeprägt; je nach gefordertem Beugungswirkungsgrad kann das Beugungsgitter mit anderen geeigneten gitterperiodischen Oberflächenstrukturen versehen werden, sofern diese im Rahmen der üblichen Fertigungstechnologien realisierbar sind. Die besondere Wirkung dieser mikromechanischen Integration des Beugungsgitters liegt in der Möglichkeit zur Verkürzung des optischen Strahlenganges und zur daraus resultierenden Minimierung des Monochromators. Außerdem bietet die technologisch durchgängige Herstellbarkeit der Spiegel-Gitter-Kombination wesentliche preisliche Vorteile auch in der Montage eines Monochromators. Die mit üblichen Fertigungsmethoden erzielbaren Gitterkonstanten in der Größenordnung von  $1\text{ }\mu\text{m}$  gestatten insbesondere Wellenlängenintervalle der Monochromatoren im VIS und NIR-Bereich.

Eine weitere Vereinfachung des Monochromatoraufbaus wird anhand Fig. 5 schematisch gezeigt. Das auf dem mi-

kromechanischen Kippspiegel (5) integrierte Beugungsgitter (13) weist eine derartige Ortsabhängigkeit seiner lateralen Gitterperiodizität auf, daß es diffraktiv-optisch abbildend wirkt. Der eingangs- und ausgangsseitige Raumfilter beinhaltet lediglich Spaltblenden (1; 2).

Die hologrammartige Beugungsgitterstruktur erhält man für die erste Beugungsordnung konstruktiv beispielsweise aus dem Schnittbild der Kippspiegeloberfläche mit einer Schar von Rotationsellipsoiden um zwei geeignete Konstruktionspunkte als Ellipsoidfoci, wobei die optischen Gesamtweglängen vom ersten Konstruktionspunkt zum jeweiligen Ellipsoidaufpunkt und zurück zum zweiten Konstruktionspunkt sich jeweils um eine konstante Wellenlänge unterscheiden.

Jeder durch den Eintrittsspalt eingekoppelte divergente Teilstrahl wird nach dem Auftreffen auf der Gitterstruktur je nach seiner Wellenlänge und insbesondere je nach der lokalen Gitterperiode und -orientierung zu einem definierten wellenlängenabhängigen Focus gebeugt, wobei der Austrittsspalt einen dieser Foci für die Strahlungsauskopplung selektiert.

Je nach Relativwinkel des Beugungsgitters zu den Spalten ergeben sich nach dem Schema eines Rowlandkreises geringfügige Aberrationen der wellenlängenabhängigen Foci von der fixen Spaltebene (1, 2); die daraus resultierende Verschlechterung der spektralen Auflösung kann jedoch bei geringen Auslenkwinkeln je nach Anwendungsfall zugunsten der vereinfachten Bauweise toleriert werden, da zusätzliche abbildende Elemente entfallen.

Fig. 4 demonstriert die zweckmäßige Anordnung eines gemeinsamen mikromechanischen Kippspiegels (5) - hier beispielhaft mit integriertem Beugungsgitter (9) - als Ablenk- bzw. Dispersionseinheit für zwei vorzugsweise baugleiche Monochromatoranordnungen gleichzeitig. Die in der Seitenansicht dargestellten Monochromatoren sind hier durch subtraktive Reihenschaltung zu einem streulichtarmen Doppelmonochromator kombiniert, indem der Strahlungsausstritt (2) des ersten Monochromators durch einen Hilfsspiegel (12) mit der Strahlungseinkopplung (2) des zweiten Monochromators verbunden wurde. Die zwangsläufig synchrone Wellenlängenselektion garantiert einen exakt reproduzierbaren spektralen Durchsatz des Doppelmonochromators auch bei eventuell geringer Spiegelwinkelreproduzierbarkeit.

Allgemein lassen sich durch diese erfindungsgemäße Vereinfachung zusätzliche Spiegelantriebs- und -kontrolleinheiten einsparen. Ferner bietet diese exakte Synchronisation zweier baugleicher unabhängiger Monochromatoranordnungen, in denen vermöge eines Referenzkanals eine Strahlungsquelle in ihrem spektralen und zeitlichen Verlauf kontrolliert werden muß.

Die in den Figuren schematisch gezeigten Kippspiegel (5) besitzen beispielhaft eine rückwärtige Elektrodeninheit (6) zum Zweck des elektrostatischen Antriebs. Aus der Literatur ist ferner bekannt, die aktuelle Winkelposition der Kippspiegel kapazitiv über selbige Elektroden zu bestimmen. Diese mit einfachen mechanischen Mitteln realisierbare Winkelmessung hat jedoch den Nachteil einer geringen Winkelauflösung, bedingt durch eine geringe Linearität und eines hohen Rauschanteils wegen der nur kleinen nutzbaren Elektrodenfläche.

Die aus einkristallinem Silizium bestehenden Kippspiegel sind monolithisch über Torsionsbänder mit einem fixen Träger verbunden; daraus resultiert eine hysteresefreie Federkonstante  $c$ . Im Zusammenwirken mit dem Flächenträgheitsmoment  $J$  des Spiegels ergibt sich eine mechanische Schwingungsfrequenz  $f = 2 \cdot \pi \cdot c/J$ . Die Eigenschwingungen bei dieser Frequenz besitzen eine hohe Resonanzgüte,

da durch die Hysteresefreiheit die Dämpfung der mechanischen Schwingung sehr klein ist. Bei externer Schwingungsanregung des Kippspiegels bei eben dieser Eigenfrequenz  $\omega$  lassen sich auch mit den relativ schwachen elektrostatischen Antriebskräften hohe Auslenkwinkel  $\gamma_0$  um ca.  $2 \cdot 3^\circ$  erzielen; die Resonanzschwingung ist zudem relativ unempfindlich gegenüber externen mechanischen Störungen. Unter Einbezug der adiabatischen Kompressionskräfte des Luftpolsters zwischen Elektroden und Spiegel ergibt sich die Schwingungsgleichung

$$M = c \cdot \gamma = J \cdot d^2 \gamma / dt^2 + F_{\text{adiab}}(\gamma) + F_{\text{ex}}(\gamma, \sin(\omega \cdot t + \phi)),$$

deren Lösung näherungsweise mit

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$$

angegeben werden kann.

Im Verlauf des erfindungsgemäßen Verfahrens zum vorzugsweisen Betrieb des mikromechanischen Kippspiegels wird der Kippspiegel mit periodisch bei seiner Resonanzfrequenz (üblicherweise zwischen 100 Hz und 1 kHz) mechanisch angeregt, wobei der momentane Auslenkwinkel  $\gamma$  des Spiegels wahlweise quasikontinuierlich oder zu geeigneten diskreten Zeitpunkten  $t_i$  gemessen wird. Die so erhaltenen Winkelmeßwerte werden mit der theoretisch erhaltenen Lösung der Bewegungsgleichung korreliert, um die Parameter Schwingungsamplitude  $\gamma_0$ , Phase  $\phi$  und gegebenenfalls genaue Resonanzfrequenz  $\omega$  mittels einer numerischen Auswerteeinheit bestmöglich zu bestimmen.

Anhand dieser Parameter errechnet die Auswerteeinheit mittels obiger Lösung der Bewegungsgleichung zu jedem beliebigen Zeitpunkt  $t$  den tatsächlichen Auslenkwinkel  $\gamma(t)$  und ferner über die Winkelbeziehung der Brechung die tatsächlich selektierte Wellenlänge  $\lambda(t)$  gemäß

$$\sin(\alpha + \gamma(t)) = \sin(\beta - \gamma(t)) + N \cdot \lambda(t)/g;$$

mit  $N$  als Beugungsordnung,  $g$  als Gitterkonstante,  $\alpha$  und  $\beta$  als Einfallswinkel und Beugungswinkel des Beugungsgitters bei Nullstellung des Kippspiegels.

Bei getrennter Anordnung von Kippspiegel und Beugungsgitter nach Fig. 2 ist die optische Verdopplung des Auslenkwinkels in bezug auf den Auslenkwinkel des Spiegels sinngemäß zu berücksichtigen.

Nach dem erfindungsgemäßen Betriebsverfahren lassen sich insbesondere Triggerpunkte  $t_k$  für eine monochromatische Strahlungsmessung  $S_k$  bei vorgegebenen Wellenlängen  $\lambda_k$  ableiten; ferner läßt sich so der Spiegelantrieb zur Erhaltung der Resonanzschwingung exakt phasensynchron steuern. Umgekehrt kann einem jeden Strahlungsmeßwert  $S_k$  seine jeweilige Wellenlänge  $\lambda_k$  zugeordnet werden, was eine nachträgliche numerische Interpolation der Meßwerte zu vorgegebenen Wellenlängen gestattet.

Dieses Betriebsverfahren erhöht somit die Genauigkeit der Wellenlängenbestimmung und damit allgemein die spektrale Auflösung des erfindungsgemäßen Spektrometers wesentlich; für eine geforderte Auflösung kann also die primäre Winkelmessung des Kippspiegels mit einfachsten und relativ ungenauen Mitteln realisiert werden.

#### Patentansprüche

1. Monochromator mit mindestens einem feststehenden Raumfilter zur Begrenzung des Raumwinkelbereichs der einfallenden polychromatischen Strahlung, einem dispersiven Element zur spektral abhängigen Raumwinkeländerung dieser Strahlung sowie wenig-

stens einem weiteren feststehenden Raumfilter zur Entnahme der in den betreffenden Raumwinkelbereich geleiteten monochromatischen Strahlungsanteile, sowie mit einem Mittel zur steuerbaren strahlengeometrischen Raumwinkeländerung der Strahlung, **dadurch gekennzeichnet**, daß dieses Mittel zur Richtungsänderung des Strahlenganges ein monolithischer mikromechanischer Kippspiegel ist.

2. Monochromator nach Anspruch 1 mit mehreren strahlengeometrisch unabhängigen Kanälen, dadurch gekennzeichnet, daß ein einziger gemeinsamer mikromechanischer Kippspiegel angeordnet ist.

3. Monochromator nach Ansprüchen 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß auf der Oberfläche des mikromechanischen Kippspiegels ein ebenes Beugungsgitter integriert ist.

4. Monochromator nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das ebene Beugungsgitter auf der Oberfläche des mikromechanischen Kippspiegels eine geeignete ortsabhängige Gitterperiode und Gitterorientierung aufweist, so daß das Beugungsgitter als Teil der Raumfilter strahlengeometrische Abbildungseigenschaften besitzt.

5. Spektrometer mit Strahlungsdetektoren und Monochromator gemäß Ansprüchen 1 bis 4.

6. Verfahren zum Betrieb einer Spektrometeranordnung nach Anspruch 5 mit einer numerischen Auswerteeinheit, dadurch gekennzeichnet, daß die Kippbewegungen des mikromechanischen Kippspiegels in Übereinstimmung mit seiner mechanischen Resonanzfrequenz angeregt werden, daß zu diskreten Zeitpunkten die Spiegelwinkelposition gemessen wird, daß die gemessenen Spiegelwinkelpositionen mit der parametrisierten Lösung der Bewegungsgleichung des mikromechanischen Spiegels zum Zwecke der Gewinnung der Bewegungsparameter numerisch korreliert werden, daß anhand dieser Bewegungsparameter numerisch auf den exakten periodischen Zeitverlauf der jeweils detektierbaren Wellenlängen geschlossen wird, wobei entweder den Strahlungsdetektormesswerten die jeweilig ermittelte Wellenlänge zugeordnet und/oder die Strahlungsdetektion bei Erreichen von vorgegebenen Wellenlängen getriggert wird, und ferner wahlweise die Anregung des Kippspiegels phasensynchron gesteuert wird.

---

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -

Fig. 1

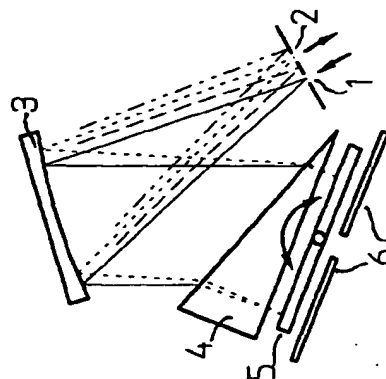


Fig. 2

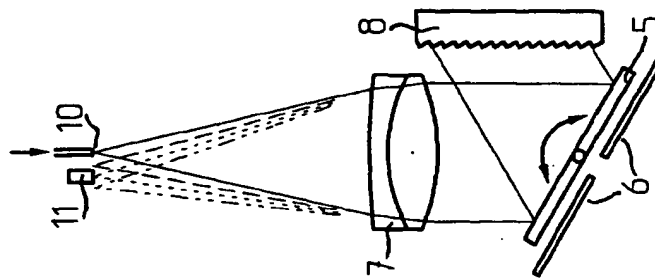


Fig. 3

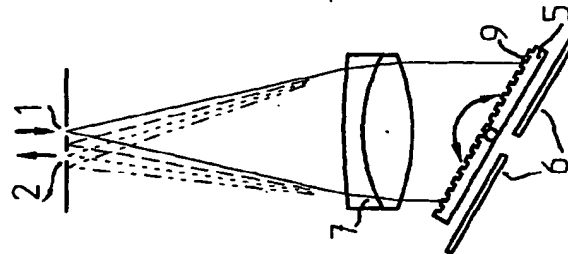


Fig. 4

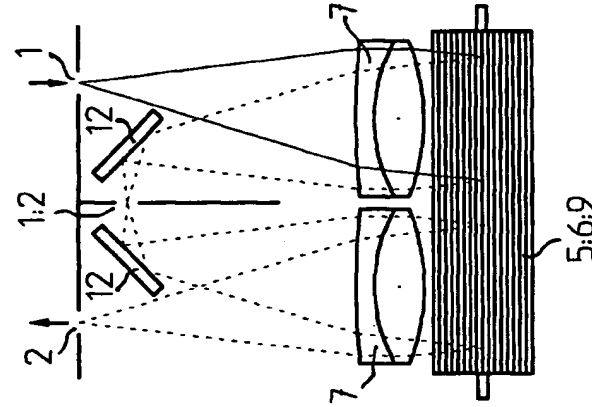


Fig. 5

